Iranian Food Science and Technology Research Journal
Vol. 19, No. 2, May-June 2023, p. 217-229

نشریه پژوهشهای علوم و صنایع غذایی ایران
جلد ۱۹، شماره ۲، خرداد- تیر ۱۴۰۲ ص. ۲۲۹-۲۱۷

Homepage: http://ifstrj.um.ac.ir
Research Paper

The Effect of Non-thermal Plasma on Improvement of Functional Properties of Sorghum Starch

F. Shokrollahi[1], F. Shahidi[2]*, M.J. Varidi[3], A. Koocheki[4], F. Sohbatzadeh[5]

Received: 2021.06.14
Revised: 2021.07.27
Accepted: 2021.08.04
Available Online: 2021.09.15

How to cite this article:
Shokrollahi, F., Shahidi, F., Varidi, M.J., Koocheki, A., & Sohbatzadeh, F. (2023). The effect of non-thermal plasma on improvement of functional properties of sorghum starch. *Iranian Food Science and Technology Research Journal*, *19*(2), 217-229. (In Persian with English abstract). http://doi.org/10.22067/ifstrj.2021.70973.1062

Introduction
Sorghum is a valuable source of starch for human use, being a drought-tolerant cereal grain that contains a large amount of starch (approximately 70%). However, native sorghum starch has limited application in the food industry due to its poor functional properties. Modification of sorghum starch would overcome its shortcomings and tailor it to the targeted application. Among physical methods, non-thermal plasma is a novel method for starch modifications. Plasma is an ionized gas including electrons, atoms, ions, radicals, and quanta of electromagnetic radiation that affects the functional properties of starch. The effect of plasma on starch is influenced by apparatus type, treatment conditions (feed gas, time, and power), and the source of starch. Two main mechanisms of starch modification are known as cross-linking and oxidation together with depolymerization. Although the effect of plasma on many types of starch has been investigated, no research has yet been found on sorghum starch modification by non-thermal plasma. So, this investigation determines the effects of non-thermal plasma on sorghum starch to overcome the deficiency of the native form and to explore wider applications for sorghum starch.

Materials and Methods
Sorghum starch was extracted by alkaline steeping and purified using toluene-salt-water treatment. Dielectric Barrier Discharge (DBD) plasma was performed to modify sorghum starch. The applied DBD plasma setup consisted of two flat rectangular aluminum electrodes with the dimension of 6.5×45 cm and 7×18 cm and an electrode distance of 3 and 6 mm for air and argon plasma, respectively. Each of the electrodes was covered with a mica sheet as a dielectric barrier. DBD reactor was supplied with alternating current (AC). The frequency was adjusted to 375 Hz. Starch samples were treated for 1, 10, and 20 min at 23 kV at atmospheric pressure. The amylose content of sorghum starch was determined by iodine binding colorimetry. Evaluation of other chemical parameters including protein, lipid, ash, and moisture was carried out according to AAC methods. The clarity was determined using a spectrophotometer at 650 nm. The swelling and solubility of 1.5% sorghum starch suspension (at 55, 65, 75, and 85 °C) were measured using the centrifuge method. The centrifuge-filtration method was performed to evaluate freeze-thaw stability of sorghum starches up to 4 cycles.

Results and Discussion
Chemical parameters showed that the extracted sorghum starch was purified. The amount of protein, lipid, ash, and amylose was 0.39, 0.15, 0.59, and 29.23%, respectively. Plasma caused significant altering in sorghum starch properties. Compared to the argon plasma, the air plasma was more effective at increasing the clarity, solubility, and

---

1, 2, 3 and 4- Former Ph.D. Student and Professors, Department of Food Science and Technology, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, respectively.
(*- Corresponding Author Email: fshahidi@um.ac.ir)
5- Professor, Department of Atomic and Molecular Physics, Faculty of Sciences, University of Mazandaran, Babolsar, Iran
DOI: 10.22067/ifstrj.2021.70973.1062

freeze-thaw stability. Increasing the time of treatment also improved the above-mentioned functional properties. The clarity of native starch (14.02%) was increased to 56.10% for the sample treated with air plasma for 20 min, probably due to intense oxidation and depolymerization of starch molecules. While the lowest clarity (13.07%) belonged to the 1-min argon plasma treated sample, this value was improved with increasing time of treatment. Probably cross-linked bonds were predominantly formed during the first minute of argon plasma treatment, resulting in a reduction of paste clarity, while a competitive depolymerization and oxidation reaction could be a reason for the increase of paste clarity. Solubility was increased for all treatments (except for argon-1 min). The highest solubility in each of the temperatures was found for 20 min air plasma treated sample. Depolymerization of starch molecules under plasma treatment produces low molecular weight fragments which leach out easily and increase solubility. The swelling power of 20 min air plasma treated starch was lower than that of native starch, probably due to the structural disintegration. Other samples had higher swelling power. The lower freeze-thaw stability of 1 and 10 min argon plasma treated samples may be due to cross-linking which increase retrogradation. The 20 min air-plasma treated sample had higher stability than other samples in 3 and 4th cycles of freeze-thawing. The freeze-thawing stability of other samples was similar to that of the native starch.

Conclusion

Non-thermal plasma treatment improved the functional properties of sorghum starch. The best results were detected for the sample treated with air plasma for 20 min. Cross-linking may be the main reaction in the first minute of argon-plasma treatment. However, this mechanism was suppressed in a longer treatment time. It may also be stated that the effect of oxidation along with depolymerization was predominant in air-plasma treatment.

Keywords: Argon plasma, Clarity, Freeze-thaw stability, Solubility

Iranian Food Science and Technology Research Journal
Vol. 19, No. 2, May-June 2023, p. 217-229

نشریه پژوهشهای علوم و صنایع غذایی ایران
جلد ۱۹، شماره ۲، خرداد - تیر ۱۴۰۲ ص. ۲۲۹-۲۱۷

مقاله پژوهشی

اثر پلاسمای غیرحرارتی بر بهبود ویژگی‌های عملکردی نشاسته سورگوم

فاطمه شکرالهی[۱]- فخری شهیدی[۲*]- محمدجواد وریدی[۳]- آرش کوچکی[٤]- فرشاد صحبت‌زاده[٥]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۳/۲۴
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۰۵/۰۵
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۵/۱۳

چکیده

سورگوم گیاهی مقاوم به خشکی است که با توجه به محتوای بالای نشاسته، منبع مناسبی برای استخراج نشاسته می‌باشد. اما ویژگی‌های ضعیف عملکردی نشاسته سورگوم، استفاده از آن را محدود می‌سازد. استفاده از پلاسمای غیرحرارتی به عنوان روشی نوظهور، می‌تواند سبب بهبود خواص عملکردی نشاسته از جمله شفافیت، حلالیت و پایداری در برابر انجماد-ذوب شود. از این رو، در این پژوهش، اثر متغیرهای تیمار پلاسما شامل نوع گاز (هوا و آرگون) و زمان تیمار (۱، ۱۰ و ۲۰ دقیقه) بر شفافیت، حلالیت (در دماهای ۵۵، ۶۵، ۷۵ و ۸۵ درجه سلسیوس)، تورم (در دماهای ۵۵، ۶۵، ۷۵ و ۸۵ درجه سلسیوس)، پایداری در برابر انجماد-ذوب (در ۴ دوره متوالی) و سختی بافت ژل نشاسته سورگوم بررسی شد. نتایج نشان داد که پلاسمای هوا (در مقایسه با پلاسمای آرگون) و همچنین زمان‌های بیشتر تیمار (در مقایسه با زمان کم)، سبب بهبود شفافیت، حلالیت و پایداری در برابر انجماد-ذوب (در دوره دوم تا چهارم) شدند. مقدار شفافیت، حلالیت (در ۸۵ درجه سلسیوس)، تورم (در ۸۵ درجه سلسیوس) و پایداری در برابر انجماد-ذوب (در دوره چهارم) در نشاسته شاهد به ترتیب ۱۴/۰۲ درصد، ۱۶/۹۵ درصد، ۲۰/۶۶ گرم/گرم و ۵۶/۸۵ درصد بود که در نمونه هوا-۲۰ دقیقه به ۵۶/۱۰ درصد، ۷۰/۰۲ درصد، ۱۵/۶۷ گرم/گرم و ۴۹/۰۶ درصد و در نمونه آرگون-۲۰ دقیقه به ۱۷/۰۹ درصد،۳۳/۴۷ درصد، ۲۳/۲۴ گرم/گرم و ۵۸/۳۰ درصد رسید. کمترین و بیشترین مقدار سختی بافت به تریب مربوط به نمونه‌های هوا-۲۰ دقیقه و آرگون ۱-دقیقه بودند. احتمالاً واکنش اصلی در پلاسمای هوا، اکسیداسیون و دپلیمریزاسیون بوده، اما در پلاسمای آرگون در زمان ۱ دقیقه، اغلب اتصال عرضی رخ داده و پس از آن با افزایش زمان، اثر اکسیداسیون و دپلیمریزاسیون بر اتصال عرضی غالب گردیده است.

واژه‌های کلیدی: پایداری به انجماد-ذوب، پلاسمای آرگون، حلالیت، شفافیت

مقدمه

سورگوم[۶] گیاهی مقاوم به خشکی است که علاوه بر هزینه پایین تولید، غنی از نشاسته می‌باشد (حاوی حدوداً ۷۰ درصد نشاسته). به همین جهت، منبعی مناسب برای استخراج نشاسته است. اما ضعف در ویژگی‌های عملکردی مانند شفافیت، حلالیت و پایداری در برابر انجماد-ذوب، موجب محدودیت کاربرد نشاسته سورگوم می‌شود (Ehtiati, 2018). با اعمال تیمارهای مناسب و اصلاح نشاسته، علاوه بر رفع محدودیت‌ها می‌توان آن را برای اهداف صنعتی مورد نظر مناسب ساخت.

از میان روش‌های شیمیایی، فیزیکی و آنزیمی برای اصلاح نشاسته، روش‌های فیزیکی مورد توجه بیشتری قرار گرفته‌اند زیرا زمان و آب کمتری مصرف می‌کنند، آلودگی زیست محیطی ندارند، نیاز به مواد مصرفی گران‌قیمت ندارند و قابل کنترل و تکرارپذیر هستند. همچنین مصرف‌کنندگان نگرانی کمتری نسبت به این روش-ها دارند. یکی از روش‌های فیزیکی که در سال‌های اخیر پژوهش‌های

۱، ۲، ۳ و ۴- به‌ترتیب دانش‌آموخته دکتری و استادان، گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد
(*- نویسنده مسئول: Email: fshahidi@um.ac.ir)
۵- استاد، گروه فیزیک اتمی و مولکولی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه مازندران، بابلسر، ایران
DOI: 10.22067/ifstrj.2021.70973.1062
6- Sorghum

بسیاری را به خود اختصاص داده، پلاسمای غیرحرارتی[1] است (Thirumdas *et al.*, 2017a).

پلاسما بعد چهارم ماده است که از گونه‌های فعالی مانند رادیکال های آزاد، الکترون‌ها، یون‌های مثبت و منفی، فرمهای برانگیخته و تعداد زیادی مولکول‌های آزاد خنثی تشکیل شده است. پلاسما به دو دسته پلاسمای دمای بالا یا حرارتی و پلاسمای دمای پایین یا غیرحرارتی یا سرد تقسیم می‌شود. از پلاسمای سرد می‌توان برای فراورده‌های حساس به حرارت استفاده نمود (Thirumdas *et al.*, 2017a).

پلاسما به دو روش اصلی بر نشاسته اثر می‌گذارد: اتصال عرضی و اکسیداسیون توأم با دپلیمریزاسیون. رادیکال‌های آزاد و الکترون‌های پرانرژی سبب اتصال زنجیره‌های نشاسته می‌شوند (Thirumdas *et al.*, 2017a). اتصال عرضی در نشاسته‌های تیمارشده با پلاسما، با شکل‌گیری پیوند C-O-C میان دو واحد گلوکز و تولید یک مولکول آب رخ می‌دهد. درحالی‌که در روش‌های شیمیایی به دلیل استفاده از واسطه‌های شیمیایی (عامل X)، پیوند C-O-X-O-C به وجود می‌آید (Zou *et al.*, 2004). واکنش اکسیداسیون از تبدیل گروه‌های هیدروکسیل متصل به کربن‌های شماره ۲، ۳ و ۶ به گروه کربونیل صورت می‌گیرد و می‌تواند تا تبدیل کربونیل به اسید کربوکسیلیک پیشروی کند. علاوه بر آن، ممکن است منجر به شکستن پیوند گلیکوزیدی در موقعیت C1 و تبدیل آن به گروه هیدروکسیل شود (دپلیمریزاسیون). البته در تیمار با پلاسمای غیرحرارتی، معمولاً موقعیت C6 اکسیده می‌شود (Khorram *et al.*, 2015). یون‌های پرانرژی که در پلاسما وجود دارند سبب دپلیمریزاسیون زنجیره‌های آمیلوز و آمیلوپکتین می‌شوند. این امر حتی در سطوح پایین انرژی هم رخ می‌دهد. پلاسمای غیرحرارتی از طریق مکانیسمهای ذکر شده منجر به تغییر ویژگی‌های مختلف نشاسته می‌شود که این تغییرات بسته به پارامترهای پلاسما (نوع گاز، زمان و ولتاژ یا توان) و نوع نشاسته متفاوت است (Thirumdas *et al.*, 2017a). ویژگی‌های عملکردی نشاسته‌های اصلاح‌شده توسط پلاسمای غیرحرارتی تقریباً مشابه نشاسته‌های دارای اتصال عرضی و نشاسته‌های اکسیدشده با مواد شیمیایی است. پژوهش‌های مختلفی برای بهبود ویژگی‌های نشاسته سورگوم با استفاده از روش‌های شیمیایی نظیر رقیق‌سازی با اسید، استیلاسیون و اکسیداسیون انجام شده است (Singh *et al.*, 2009 & 2012; Ali and Hasnain, 2014; Olayinka *et al.*, 2013). این درحالی است که در بین نشاسته‌های تیمارشده با پلاسمای غیرحرارتی، انواع مختلف شامل گندم، برنج، ذرت، ذرت واکسی، ذرت با آمیلوز بالا، سیب‌زمینی، سیب‌زمینی شیرین، تاپیوکا، کاساوا و جو به چشم می‌خورد. اما در بررسی منابع انجام شده، پژوهشی در ارتباط با اصلاح ویژگی‌های عملکردی نشاسته سورگوم به وسیله پلاسمای غیرحرارتی یافت نشد. بنابراین، با توجه به اهمیت اصلاح ویژگی‌های عملکردی نشاسته سورگوم از یک طرف، و توانایی پلاسمای غیرحرارتی در اصلاح نشاسته‌ها از طرف دیگر، هدف از این پژوهش بهبود ویژگی‌های عملکردی نشاسته سورگوم با استفاده از پلاسمای غیرحرارتی حاصل از گاز هوا و آرگون می‌باشد.

مواد و روش‌ها

سورگوم سفید لاین KDFGS9 از موسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر کرج تهیه شد. مواد شیمیایی از شرکت مرک خریداری شدند. آرگون از نوع آزمایشگاهی و با خلوص ۹۹/۹ درصد از شرکت فرافن گاز تهران تهیه گردید. دستگاه پلاسما از نوع تخلیه سد دی‌الکتریک[2] (DBD) توسط گروه فیزیک اتمی و مولکولی دانشگاه مازندران ساخته شد.

استخراج نشاسته سورگوم

استخراج نشاسته بر اساس روش اولایینکا و همکاران (Olayinka *et al.*, 2013)، و با کمی تغییر طبق روش احتیاطی (Ehtiati, 2018)، انجام شد. پس از تمیز کردن و شستشوی دانه‌ها با آب، آب مقطر به میزان ۵ برابر وزن دانه‌ها به آن‌ها اضافه گردید. pH مخلوط آب و دانه‌ها در محدوده ۸/۵– ۸ تنظیم و برای ۲۴ ساعت در یخچال نگه‌داری شد. بعد از دور ریختن آب اضافی، دانه‌ها کاملاً با آب شستشو شدند. مقدار کمی آب مقطر به دانه‌ها اضافه و با خردکن آزمایشگاهی، خرد شدند. سوسپانسیون ایجادشده از الک با مش ۱۰۰ عبور داده شد. ذرات باقیمانده روی الک مجدداً همراه با مقدار کمی آب مقطر خرد و از الک با قطر حفره ۷۵ میکرون عبور داده شدند. pH سوسپانسیون به ۸ رسانیده شد، و پس از هم زدن به مدت ۳۰ دقیقه، ۲ ساعت در دمای یخچال نگه‌داری شد تا نشاسته ته‌نشین شود. لایه شناور بالایی حذف و لایه ته‌نشین شده با آب مقطر مخلوط گردید. این مخلوط در شتاب ۸۰۰g به مدت ۱۰ دقیقه سانتریفیوژ و سپس لایه شناور بالایی خالی شد. سپس لایه خاکستری رنگ بالایی که شامل فیبر، پروتئین و چربی است توسط اسپاتول و قاشقک حذف شد. آب مقطر به فالکون‌ها اضافه و پس از تکان دادن و معلق کردن لایه نشاسته، به مدت ۵ دقیقه سانتریفیوژ شد. مرحله اخیر سه بار تا عدم مشاهده لایه خاکستری تکرار گردید. در ادامه از روش ادکینز و گرینوو (Adkins and Greenwoo, 1996)، برای افزایش خلوص نشاسته استفاده شد. نشاسته خالص‌شده در آون با

1- Non-thermal plasma

2- Dielectric Barrier Discharge

دمای ۳۵ درجه سلسیوس به مدت ۲۴ ساعت خشک و سپس به آرامی با دست خرد و از الک با مش ۱۰۰ عبور داده شد.

دستگاه تخلیه سد دی‌الکتریک (DBD)

در این پژوهش، از سیستم DBD به منظور تولید پلاسما استفاده شد. منبع تغذیه از نوع AC و فرکانس و دیوتی دستگاه به ترتیب ۳۷۵ هرتز و ۷۲ درصد بود. در هر دو سیستم تولیدکننده‌ی پلاسمای هوا و آرگون، از دو صفحه موازی آلومینیومی به عنوان الکترود استفاده شد که هر کدام از آن‌ها توسط یک صفحه میکا به عنوان عایق پوشانده شده بودند. در سیستم هوا و آرگون، ابعاد الکترودها به ترتیب ۶/۵ × ۴۵ و ۷ × ۱۸ سانتی‌متر و فاصله الکترودها از یکدیگر به ترتیب ۳ و ۶ میلی‌متر بود. جریان ورودی گاز آرگون ۱/۵ لیتر بر ثانیه تنظیم شد. در سیستم پلاسمای آرگون، از تعدادی لام چسبیده به یکدیگر (مجموعاً به ضخامت ۶ میلی‌متر) برای پوشاندن قسمت باز دستگاه (به منظورکاهش خروج آرگون از محفظه‌ی دستگاه و کاهش ورود هوا به آن) استفاده شد. برای انجام تیمار، مقدار اندکی از پودر نشاسته توسط الک کوچکی روی تمام سطح میکای پایینی دستگاه پاشیده شد تا لایه نازکی به ضخامت تقریباً ۱ میلی‌متر تشکیل دهد. نمونه‌ها به مدت ۱، ۱۰و ۲۰ دقیقه با ولتاژ ۲۳ ولت تیمار شدند و تا زمان انجام آزمون‌ها، در ظروف پلی‌اتیلنی دربسته نگه‌داری شدند. نشاسته‌ای که به وسیله پلاسما تیمار نشد، به عنوان "شاهد" نام‌گذاری شد.

ترکیب شیمیایی نشاسته سورگوم

اندازه‌گیری رطوبت، پروتئین، چربی و خاکستر به ترتیب به روش آون‌گذاری، کجلدال، سوکسله و سوزاندن در کوره طبق استاندارد AACC (2000) و آمیلوز طبق روش مک‌گرنس و همکاران (McGrance *et al*., 1998)، انجام شد.

شفافیت خمیر

مطابق روش احتیاطی (Ehtiati, 2018)، سوسپانسیون ۱ درصد نشاسته در لوله شیشه‌ای درپیچ‌دار تهیه و ژلاتینه شدن طی ۳۰ دقیقه حرارت‌دهی در حمام آب جوش انجام شد. نمونه‌ها در این مدت، هر ۵ دقیقه به مدت ۳۰ ثانیه توسط همزن گردابی یکنواخت می‌شدند. پس از سرد کردن لوله‌ها در دمای اتاق به مدت ۱۰ دقیقه، درصد عبور نور از نمونه به وسیله اسپکتروفوتومتر (Unico uv-2100) در طول موج ۶۵۰ نانومتر اندازه‌گیری شد.

حلالیت و قدرت تورم

مقدار معینی سوسپانسیون ۱/۵ درصد وزنی–وزنی نمونه درون لوله شیشه‌ای درب‌پیچ‌دار تهیه شد. یکنواخت‌سازی نمونه‌ها توسط همزن گردابی انجام شد و سپس لوله‌های حاوی نمونه در حمام آب با دماهای ۵۵، ۶۵، ۷۵ و ۸۵ درجه سلسیوس قرار گرفتند و هر ۵ دقیقه یکبار به وسیله همزن گردابی یکنواخت شدند. پس از ۳۰ دقیقه حرارت‌دهی، لوله‌ها خارج و پس از خنک شدن، به مدت ۱۵ دقیقه در ۳۰۰۰ g سانتریفوژ شدند. سوپرناتانت در پلیت با وزن معین تخلیه و در آون با دمای ۱۱۰ درجه سلسیوس تا رسیدن به وزن ثابت خشک گردید. وزن لایه ته‌نشین‌شده محاسبه و سپس حلالیت و قدرت تورم مطابق روابط ۱ و ۲ تعیین شدند (Ehtiati, 2018).

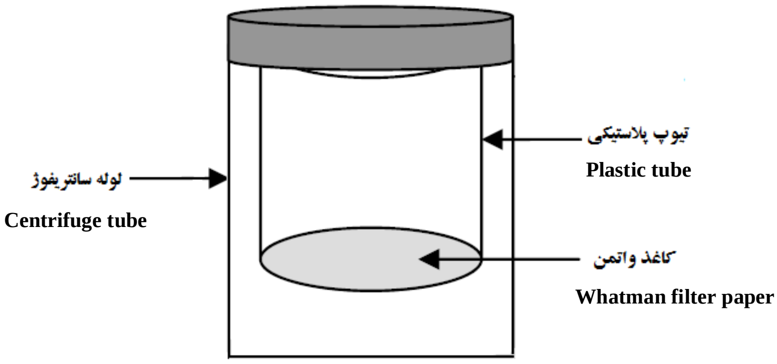
مقادیر m1 تا m3 به ترتیب وزن نمونه اولیه نشاسته، مایع رویی خشک‌شده و لایه ته‌نشین‌شده هستند.

$$\text{حلالیت} = \frac{m2 \times 100}{m1} \qquad (۱)$$

$$\text{قدرت تورم} = \frac{m3}{m1 - m2} \qquad (۲)$$

پایداری در برابر انجماد–ذوب

طبق روش احتیاطی (Ehtiati, 2018)، ابتدا نمونه‌های سوسپانسیون ۵٪ نشاسته در آب دیونیزه حاوی ۲۰۰ ppm سدیم آزید تهیه و پس از صرف ۳۰ دقیقه جهت آبگیری، به مدت ۲۵ دقیقه در آب جوش حرارت دیدند. در این مدت، نمونه‌ها هر ۳ دقیقه به مدت حداقل ۳۰ ثانیه یکنواخت می‌شدند. سپس مقدار مشخصی از نمونه‌ها به ظروف درب‌دار پلاستیکی منتقل و به مدت ۲۴ ساعت در فریزر منجمد گردیدند. تمامی نمونه‌ها از فریزر خارج شدند و رفع انجماد در دمای ۳۰ درجه سلسیوس به مدت ۲ ساعت انجام گرفت. سه عدد از نمونه‌ها سانتریفوژ، و سایر نمونه‌ها به فریزر برگردانده شدند. این عمل تا ۴ روز به صورت روزانه انجام پذیرفت. سینرسیس به روش سانتریفوژ–فیلتراسیون (شکل ۱) ارائه شده توسط کاروئنرین و همکاران (Charoenrein *et al*., 2008) اندازه‌گیری شد. به این منظور، به وسیله میله‌ای نازک، سوراخ‌هایی به قطر تقریباً ۱ میلی‌متر در کف تیوپ پلاستیکی ایجاد شد تا آب از آن‌ها عبور کند. کاغذ واتمن شماره ۴۱ در کف تیوپ پلاستیکی قرار گرفت و وزن تیوپ به همراه کاغذ ثبت شد (w1). سپس نمونه روی کاغذ صافی قرار داده شد و مجدداً وزن آن ثبت گردید (w2). درب تیوپ (که برای لوله سانتریفوژ هم مناسب بود) بسته شد و درون لوله سانتریفوژ با وزن مشخص (w3) قرار گرفت. نمونه به مدت ۱۰ دقیقه در شتاب ۱۰۰ g سانتریفوژ شد (سانتریفوژ PECO do-16). ابتدا تیوپ درب‌دار خارج شد و سپس وزن لوله سانتریفوژ حاوی آب یادداشت گردید (w4). سینرسیس مطابق رابطه ۳، بر حسب درصد آب جدا شده نسبت به وزن اولیه ژل محاسبه شد.



شکل ۱- سیستم سانتریفوژ-فیلتراسیون
Fig. 1- Centrifuge-filtration system

$$\text{سینرسیس} = \frac{(w4 - w3) \times 100}{(w2 - w1)} \quad (۳)$$

سختی[1] ژل

خمیر ۱۴٪ وزنی-وزنی نشاسته در دستگاه آنالایز سریع ویسکوزیته (Starch Master2, Newport scientific, Australia) RVA طبق برنامه دمایی مقابل حرارت داده شد: نگه‌داری در ۵۰°C به مدت ۱ دقیقه، افزایش دما به ۹۵ °C با سرعت ۱۲ درجه بر دقیقه، نگه‌داری در ۹۵°C به مدت ۲/۵ دقیقه، کاهش دما به ۵۰°C با سرعت ۱۲ درجه بر دقیقه، نگه‌داری در ۵۰°C به مدت ۲ دقیقه. سپس نمونه ژلاتینه‌شده بلافاصله به قالب استوانه‌ای با ارتفاع و قطر ۱۰ میلی‌متر منتقل و به مدت ۲۴ ساعت در یخچال نگه‌داری گردید. آزمون TPA با استفاده از دستگاه بافت‌سنج (TAXT-2i Texture analyzer, Stable Microsystems, Surrey, England) و پروب استوانه‌ای با قطر ۲۵/۴ میلی‌متر در دمای محیط، تحت شرایط دو بار فشردن، با سرعت ۲ میلی‌متر بر ثانیه، درصد تغییرات ۵۰ و نیروی بارگذاری اولیه ۱۰ گرم و عدم مکث بین دو فشردگی انجام شد (Ehtiati, 2018).

تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها

آزمایش‌ها در قالب فاکتوریل با طرح کاملاً تصادفی (بر مبنای دو عامل نوع گاز و مدت زمان تیمار) و در ۳ تکرار انجام شدند. آنالیز واریانس و مقایسه میانگین‌ها (با استفاده از آزمون توکی در سطح اطمینان ۹۵ درصد) به وسیله نرم‌افزار Minitab نسخه ۱۷ انجام پذیرفت. از نرم‌افزار Excel برای محاسبه مقادیر انحراف معیار و ترسیم نمودار استفاده شد.

1- Hardness

نتایج و بحث

ترکیب شیمیایی نشاسته سورگوم

مقادیر پروتئین، چربی، خاکستر و آمیلوز به ترتیب ۰/۳۹، ۰/۱۵، ۰/۵۹، ۲۹/۲۳ بر مبنای وزن خشک و رطوبت ۹/۳۲ به دست آمدند. نتایج به‌دست آمده، بیانگر کارایی فرآیند خالص‌سازی و دستیابی به خلوص مناسبی از نشاسته سورگوم می‌باشد. مقادیر به دست آمده، با نتایج احتیاطی (Ehtiati, 2018) همخوانی داشت.

شفافیت خمیر

شفافیت خمیر نشاسته، نقش اساسی در کاربردهای غذایی به ویژه فراورده‌های ژله‌ای دارد (Wu *et al.*, 2019). طی ژلاتینه شدن نشاسته در غلظت کم، گرانول‌ها متورم شده و در نهایت از هم گسسته و به ذرات گرانول تبدیل می‌شوند. هرچه ذرات ایجادشده کوچکتر باشند، عبور نور بیشتر شده و شفافیت افزایش می‌یابد (Liu *et al.*, 2014).

جدول ۱، نشان می‌دهد که تأثیر پلاسمای هوا بسیار بیشتر از پلاسمای آرگون بوده است، به نحوی که بیشترین میزان شفافیت خمیر نشاسته (۵۶/۱۰ درصد) با اعمال تیمار هوا به مدت ۲۰ دقیقه حاصل شد که تقریباً ۴ برابر شفافیت نمونه شاهد (۱۴/۰۲ درصد) و ۳/۳ برابر شفافیت نمونه تیمار شده با آرگون به مدت ۲۰ دقیقه (۱۷/۰۹ درصد) است. پژوهش‌های پیشین نیز نشان‌دهنده تأثیر زیاد پلاسمای هوا بر شفافیت نشاسته‌های برنج و ذرت (Wu *et al.*, 2019; Thirumdas *et al.*, 2017 b; Pal *et al.*, 2016) و تأثیر کم پلاسمای آرگون بر شفافیت نشاسته تاپیوکا (Chaiwat *et al.*, 2016; Wongsagonsup *et al.*, 2014 a) هستند.

توانایی پلاسمای هوا در افزایش شفافیت نشاسته سورگوم، احتمالاً به دلیل واکنش‌های اکسیداسیون و دپلیمریزاسیون بوده است.

دپلیمریزاسیون و کاهش اندازه مولکول‌ها، موجب تفکیک راحت‌تر مولکول‌ها در محیط و به عبارتی عبور بیشتر نور می‌شود. همچنین افزایش گروه‌های هیدروکسیل موجب افزایش پیوند هیدروژنی با مولکول‌های آب و افزایش شفافیت می‌گردد (Thirumdas *et al.*, 2017 b; Wu *et al.*, 2019). حضور گروه‌های آب‌دوست و حجیم کربوکسیل و دافعه میان آن‌ها نیز می‌تواند سبب افزایش شفافیت شود (Ali and Hasnain, 2014).

برای افزایش شفافیت نشاسته معمولاً از روش‌های شیمیایی اکسیداسیون و هیدرولیز اسیدی استفاده می‌شود. برای مثال، علی و حسنین (Ali and Hasnain, 2014)، گزارش کردند که شفافیت نشاسته سورگوم پس از رقیق‌سازی با اسید کلریدریک با افزایش ۳/۶ برابری، از تقریبا ۵ به ۱۸ درصد و پس از اکسیداسیون شیمیایی با افزایش ۸ برابری، از تقریبا ۵ به ۴۰ درصد رسید. بنابراین نتایج پژوهش حاضر نشان می‌دهد که پلاسمای هوا توانایی قابل توجهی برای افزایش شفافیت نشاسته سورگوم دارد و قابل رقابت با روش‌های شیمیایی است.

تیمار با پلاسمای آرگون در زمان ۱ دقیقه سبب کاهش معنی‌دار شفافیت شد. احتمالاً اتصال عرضی، موجب بزرگ شدن مولکول‌ها و درنتیجه کاهش شفافیت شده است (Kaur *et al.*, 2006). با افزایش زمان اعمال پلاسمای آرگون به مدت ۱۰ و ۲۰ دقیقه بر میزان شفافیت افزوده شد تا حدی که از شفافیت نمونه شاهد هم بیشتر گردید. چایوات و همکاران (Chaiwat *et al.*, 2016)، با گزارش روندی مشابه در نشاسته‌های تیمارشده با پلاسمای آرگون اظهار داشتند که در زمان‌های بیشتر اعمال تیمار پلاسما، اثرات اکسیداسیون و دپلیمریزاسیون بر اتصال عرضی غالب می‌شود که موجب افزایش شفافیت می‌گردد. ازآنجاکه فقط مولکول‌های سطح گرانول در معرض پلاسما قرار دارند و تحرک مولکول‌های نشاسته نیز کم است، محدودیت در اتصال این مولکول‌ها به وجود می‌آید. بنابراین در زمان کم، عمدتاً اتصال عرضی رخ می‌دهد و سپس با افزایش زمان و تأمین انرژی بیشتر، چون محدودیت برای انجام اتصال عرضی وجود دارد، دپلیمریزاسیون و شکست پیوند گلیکوزیدی شدت می‌گیرد (Wongsagonsup *et al.*, 2014 a; Chaiwat *et al.*, 2016).

جدول ۱- تأثیر پلاسمای هوا و آرگون بر شفافیت نشاسته سورگوم

Table 1- Effect of air and argon plasma on the clarity of sorghum starch

نمونه Sample	شفافیت (درصد) Clarity (%)
شاهد (control)	14.02 ± 0.12 [d]
هوا-۱ دقیقه (air-1 min)	14.03 ± 0.15 [d]
هوا-۱۰ دقیقه (air-10 min)	16.02 ± 0.02 [c]
هوا-۲۰ دقیقه(air-20 min)	56.10 ± 0.26 [a]
آرگون-۱ دقیقه (argon-1 min)	12.64 ± 0.13 [e]
آرگون-۱۰ دقیقه (argon- 10 min)	16.74 ± 0.14 [b]
آرگون-۲۰ دقیقه (argon-20 min)	17.09 ± 0.19 [b]

اعداد با حروف مشترک در یک ستون، تفاوت معنی‌داری ($p<0.05$) ندارند.

Numbers with the same letters in a column are not significantly different ($p < 0.05$).

در دماهای ۷۵ و ۸۵ درجه سلسیوس، تورم نمونه تیمار شده با هوا به مدت یک دقیقه، بیشتر از نمونه شاهد بود که احتمالاً به دلیل اکسیداسیون و دپلیمریزاسیون جزئی مولکول‌های نشاسته است. تجزیه جزئی پیوندهای هیدروژنی درون و بین مولکولی نشاسته منجر به آشکار شدن و بی‌حفاظ شدن گروه‌های هیدروکسیل و برقراری پیوند هیدروژنی بین این گروه‌ها با آب می‌شود (Chong *et al.*, 2013). همچنین طی دپلیمریزاسیون، گروه‌های هیدروکسیل جدید تشکیل می‌شوند که توانایی تشکیل پیوند هیدروژنی با مولکول آب و درنتیجه افزایش تورم را دارا هستند (Biduski *et al.*, 2017). احتمالاً معرفی گروه‌های آبدوست کربوکسیل و همچنین دافعه میان بارهای منفی آن‌ها هم می‌تواند منجر به افزایش تورم گردد (Pal *et al.*, 2016). با افزایش مدت زمان تیمار پلاسمای هوا به ۲۰ دقیقه، از مقدار تورم در دماهای ۷۵ و ۸۵ درجه سلسیوس کاسته شد. این موضوع احتمالاً به دلیل تشدید واکنش‌های اکسیداسیون و دپلیمریزاسیون در زمان‌های بالاتر اعمال تیمار پلاسما است. آمیلوپکتین، عامل اصلی جذب آب و تورم گرانول نشاسته است و دپلیمریزاسیون شدید آن موجب کاهش تورم می‌شود (Sarangapani *et al.*, 2016). همچنین تخلخل شدیدتر گرانول و حضور یک ساختار اسفنج‌مانند در آن‌ها باعث می‌شود که گرانول آب را جذب کند، اما هنگام سانتریفوژ شدن آن را از دست بدهد (Wang and Wang, 2003). چانگ و همکاران (Chong *et al.*, 2013)، فروپاشی ساختاری درون گرانول نشاسته را علت کاهش تورم در نشاسته‌های اکسیدشده بیان کرده‌اند.

در پژوهش پال و همکاران (Pal *et al.*, 2016)، قدرت تورم در تمامی نمونه‌های آرد برنج تیمارشده با پلاسمای هوا بیشتر از نمونه شاهد بود و افزایش زمان و ولتاژ نیز موجب افزایش تورم شد. این

قدرت تورم

مقادیر قدرت تورم در جدول ۲، ارائه شده است. افزایش دما منجر به افزایش معنی‌دار تورم شد که احتمالاً به دلیل افزایش تحرک و انرژی مولکول‌های آب برای نفوذ به گرانول و غلبه بر پیوندهای هیدروژنی درون و بین مولکولی است (Ehtiati, 2018).

درحالی است که سارانگاپانی و همکاران (Sarangapani et al., 2016)، کاهش قدرت تورم آرد برنج پیش‌جوشانده را به دنبال افزایش زمان و توان تیمار پلاسمای هوا گزارش کردند. این نتایج نشان می دهند که نوع ماده تیمارشونده و شرایط تیمار پلاسما منجر به ایجاد پاسخ‌های متفاوتی می‌شود. چانگ و همکاران (Chong et al., 2013) نیز افزایش تورم نشاسته ذرت را در سطح کم اکسیداسیون شیمیایی و کاهش تورم را در سطوح بالاتر گزارش کردند.

در نمونه‌های تیمارشده با پلاسمای آرگون نیز در دمای ۵۵ و ۶۵ درجه سلسیوس تفاوت معنی‌داری بین تورم نمونه‌ها مشاهده نشد. در دمای ۷۵ درجه سلسیوس، تورم نمونه تیمار شده به مدت ۱ دقیقه به طور معنی‌داری بیشتر از شاهد بود. در دمای ۸۵ درجه سلسیوس، تورم تمامی نمونه‌های تیمارشده با پلاسمای آرگون بیشتر از شاهد بود. نمونه تیمارشده با آرگون به مدت یک دقیقه بیشترین میزان تورم در دمای ۸۵ درجه سلسیوس را نشان داد، که احتمالاً به دلیل اتصال عرضی مولکول‌های نشاسته و درنتیجه تقویت گرانول‌ها و افزایش توانایی آن‌ها در نگه‌داری آب بود. ونگساگونساپ و همکاران (Wongsagonsup et al., 2014b) نیز افزایش تورم نشاسته تاپیوکا را پس از وقوع مقدار محدودی اتصال عرضی گزارش کردند. کاهش تورم در دمای ۸۵ درجه سلسیوس در نمونه‌های تیمارشده با آرگون به مدت ۱۰ و ۲۰ دقیقه در مقایسه با نمونه تیمارشده با آرگون به مدت یک دقیقه، با توجه به شفافیت بیشتر این دو نمونه در مقایسه با سایر نمونه‌ها، احتمالاً به دلیل اکسیداسیون و دپلیمریزاسیون مولکول‌ها است. همانطور که پیشتر بیان شد، مقادیر بالای اکسیداسیون و دپلیمریزاسیون می‌تواند سبب کاهش تورم شود. لازم به ذکر است که برخی پژوهش‌گران (Wongsagonsup et al., Koo et al., 2010; 2014b) اظهار داشته‌اند که اتصال عرضی شدید نیز موجب تقویت و سختی بیش از حد ساختار می‌شود تاجایی‌که گرانول‌های تیمار شده به سختی اجازه ورود آب را می‌دهند، درنتیجه تورم کاهش می‌یابد. اما در آن پژوهش‌ها، کاهش تورم با پیامدهای دیگر اتصال عرضی شدید نظیر کاهش شفافیت و حلالیت همراه بوده است. حال‌آنکه در پژوهش حاضر، کاهش تورم همراه با افزایش شفافیت (جدول ۱) و حلالیت (جدول ۳) بود. جمع‌بندی این موارد نشان می‌دهد که احتمالاً در نمونه تیمار شده با آرگون به مدت یک دقیقه مقدار کمی اتصال عرضی به وجود آمد، اما پس از آن با افزایش زمان، دپلیمریزاسیون و اکسیداسیون شدت گرفت و اثرات آن‌ها بر اثرات اتصال عرضی غالب گشت.

جدول ۲- تأثیر پلاسمای هوا و آرگون بر قدرت تورم نشاسته سورگوم در دماهای مختلف

Table 2- Effect of air and argon plasma on the swelling power of sorghum starch in different temperatures

نمونه (Sample)	Swelling power (g/g) قدرت تورم (گرم ماده خشک/گرم آب)			
	55 °C	65 °C	75 °C	85 °C
شاهد (Control)	4.01 ± 0.11 aD	7.32 ± 0.28 aC	11.58 ± 0.36 aB	20.66 ± 0.62 cA
هوا-۱ دقیقه (Air-1 min)	4.07 ± 0.12 aD	7.42 ± 0.25 aC	13.03 ± 0.21 aB	22.44 ± 0.49 abA
هوا-۱۰ دقیقه (Air-10 min)	4.02 ± 0.09 aD	7.32 ± 0.27 aC	11.49 ± 0.37 aB	21.04 ± 0.36 bcA
هوا-۲۰ دقیقه (Air-20 min)	4.04 ± 0.11 aD	7.37 ± 0.33 aC	9.47 ± 0.18 cB	15.67 ± 0.45 dA
آرگون-۱ دقیقه (Argon-1 min)	4.02 ± 0.07 aD	7.31 ± 0.24 aC	12.77 ± 0.35 aB	25.38 ± 0.59 aA
آرگون-۱۰ دقیقه (Argon- 10 min)	4.06 ± 0.11 aD	7.33 ± 0.33 aC	11.36 ± 0.44 aB	23.62 ± 0.65 bA
آرگون-۲۰ دقیقه (Argon-20 min)	4.09 ± 0.13 aD	7.47 ± 0.36 aC	11.38 ± 0.45 aB	23.24 ± 0.75 bA

اعداد با حرف کوچک مشترک در یک ستون و اعداد با حرف بزرگ مشترک در یک ردیف، تفاوت معنی‌داری در سطح اطمینان ۹۵ درصد ندارند.

Numbers with the same small letters in a column and with the same capital letters in a row are not significantly different ($p < 0.05$).

حلالیت

مقدار حلالیت نشاسته سورگوم شاهد و تیمارشده با پلاسمای غیرحرارتی در جدول ۳، ارائه شده است. حلالیت نیز همانند تورم، با افزایش دمای اندازه‌گیری، افزایش یافت. در افزایش مقدار حلالیت، پلاسمای هوا مؤثرتر از پلاسمای آرگون عمل کرد تا جایی که مقدار آن را در دمای ۸۵ درجه سلسیوس از ۱۱ به ۷۰ درصد افزایش داد اما تیمار پلاسمای آرگون، حلالیت را حداکثر به ۳۳ درصد رسانید.

نمونه تیمار شده با پلاسمای هوا به مدت۲۰ دقیقه، بالاترین میزان حلالیت را در تمامی دماهای اندازه‌گیری شده نشان داد که احتمالاً به دلیل اکسیداسیون و دپلیمریزاسیون مولکول‌های نشاسته است، زیرا منجر به تولید فراکسیون‌هایی با وزن مولکولی کم می‌شود که به راحتی از گرانول به بیرون نشت پیدا می‌کنند (Sarangapani et al., 2016; Thirumdas et al., 2017b). همچنین افزایش حلالیت ممکن است به دلیل افزایش سطح گرانول‌ها از طریق ایجاد حفره و کانال در گرانول باشد که ورود مولکول‌های آب به داخل گرانول و خروج مستقیم آمیلوز از گرانول را تسهیل کرده است (Mohammadamini, 2015). سارانگاپانی و همکاران (Sarangapani et al., 2016)، تیرامداس و همکاران (Thirumdas

(et al., 2017b) و وو و همکاران (wu et al., 2019) نیز افزایش حلالیت نشاسته‌های تیمارشده با پلاسمای هوا را گزارش کردند. البته تغییر حلالیت در پژوهش‌های مذکور کمتر از پژوهش حاضر بود. بیدوسکی و همکاران (Biduski et al., 2017)، با استفاده از روش های شیمیایی اکسیداسیون و اسیدی کردن، حلالیت نشاسته سورگوم را از تقریبا ۳ به حداکثر ۹ درصد افزایش دادند.

اثر پلاسمای آرگون بر حلالیت نشاسته سورگوم در دمای ۵۵ و ۶۵ درجه سلسیوس معنی‌دار نبود. در دمای ۵۵ و ۶۵ درجه سلسیوس، نمونه‌های تیمار شده با پلاسمای آرگون به مدت ۱۰ و ۲۰ دقیقه، حلالیت بیشتری از نمونه شاهد داشتند. در نشاسته‌های تیمارشده با پلاسمای آرگون، احتمالاً نفوذ بیشتر آب به درون گرانول (افزایش تورم) سبب نشت آسان‌تر مولکول‌ها و حلالیت بیشتر شده است (Wongsagonsup et al., 2014b). علاوه بر این، در زمان‌های ۱۰ و ۲۰ دقیقه احتمالاً با شدت یافتن اکسیداسیون و دپلیمریزاسیون و درنتیجه تجزیه مولکول‌های نشاسته، حلالیت افزایش یافت. ونگساگونساپ و همکاران (Wongsagonsup et al., 2014b)، گزارش کردند که با افزایش تورم نشاسته‌های اتصال یافته، حلالیت افزایش یافته و با کاهش تورم از مقدار حلالیت نیز کاسته شده است. کو و همکاران (Koo et al., 2010)، کاهش حلالیت و تورم را در نشاسته‌های اتصال یافته با روش‌های شیمیایی، گزارش کردند.

جدول ۳- تأثیر پلاسمای هوا و آرگون بر حلالیت نشاسته سورگوم در دماهای مختلف

Table 3- Effect of air and argon plasma on the solubility of sorghum starch in different temperatures

نمونه (Sample)	Solubility (%) حلالیت (درصد)			
	55 ºC	65 ºC	75 ºC	85 ºC
شاهد (Control)	1.86 ± 0.08 bD	4.54 ± 0.31 bC	9.20 ± 0.34 dB	16.95 ± 0.44 eA
هوا-۱ دقیقه (Air-1 min)	1.90 ± 0.04 bD	5.25 ± 0.15 bC	10.09 ± 0.20 bcdB	17.17 ± 0.41 eA
هوا-۱۰ دقیقه (Air-10 min)	1.88 ± 0.03 bD	5.34 ± 0.17 bC	10.21 ± 0.55 bcdB	19.03 ± 0.46 dA
هوا-۲۰ دقیقه (Air-20 min)	20.95 ± 0.25 bD	30.09 ± 0.55 bC	44.97 ± 0.75 aB	70.02 ± 1.03 aA
آرگون-۱ دقیقه (Argon-1 min)	1.89 ± 0.08 bD	4.54 ± 0.33 bC	9.43 ± 0.33 cdB	17.26 ± 0.57 eA
آرگون-۱۰ دقیقه (Argon- 10 min)	1.95 ± 0.11 bD	4.65 ± 0.27 bC	10.44 ± 0.36 bcB	29.27 ± 0.57 bA
آرگون-۲۰ دقیقه (Argon-20 min)	1.92 ± 0.11 bD	4.66 ± 0.31 bC	10.78 ± 0.35 bB	33.47 ± 0.58 bA

اعداد با حرف کوچک مشترک در یک ستون و اعداد با حرف بزرگ مشترک در یک ردیف، تفاوت معنی‌داری در سطح اطمینان ۹۵ درصد ندارند.

Numbers with the same small letters in a column and with the same capital letters in a row are not significantly different ($p < 0.05$).

پایداری در برابر انجماد-ذوب

جدول ۴، مقادیر آب آزاد شده (سینرسیس) را طی ۴ دوره متوالی انجماد-ذوب نشان می‌دهد که مقادیر بیشتر، نشان‌دهنده پایداری کمتر در برابر انجماد-ذوب است. سینرسیس در شرایط انجماد-ذوب، تخمینی از رفتار رتروگراداسیون نشاسته طی شرایط تشدیدشده است. مقدار سینرسیس در سیکل اول انجماد-ذوب، ۴۵ درصد بود که عدد نسبتاً بالایی است. این درصد بالا، ممکن است به دلیل آمیلوز زیاد (۲۹ درصد) در نشاسته سورگوم باشد. زیرا آمیلوز احتمالاً عامل اصلی شدت رتروگراداسیون و سینرسیس طی فرایند انجماد-ذوب است (Ehtiati, 2018).

در نمونه شاهد و نمونه‌های تیمار شده با پلاسمای هوا به مدت ۱ و ۱۰ دقیقه، بیشترین میزان خروج آب در دوره‌های اول و دوم بود و پس از آن تغییر معنی‌داری رخ نداد. در نمونه‌های تیمارشده با پلاسمای آرگون، بیشترین میزان خروج آب در دوره‌های اول، دوم و سوم رخ داد. افزایش سینرسیسِ ناشی از افزایش تعداد دوره‌ها، احتمالاً به دلیل تخریب گرانول، افزایش غلظت موضعی مولکول‌های نشاسته و درنتیجه افزایش رتروگراداسیون بوده است (Vernon-Carter et al., 2015). نکته جالب توجه، کاهش سینرسیس و به عبارتی افزایش پایداری طی دوره‌ها، برای نمونه تیمار شده با هوا به مدت ۲۰ دقیقه بود که در دوره اول، سینرسیس بیشتری از شاهد داشت، اما در دوره دوم با کاهش در مقدار سینرسیس، با نمونه شاهد برابری می‌کرد. پس از آن با کاهش بیشتر سینرسیس در دوره سوم و چهارم، مقدار آن حتی از نمونه شاهد هم کمتر شد. در بررسی منابع، مورد مشابهی برای نشاسته‌های اصلاح شده دیده نشد. به نظر می‌رسد که در انجماد مجدد، مولکول‌های بسیار کوچک و دپلیمریزه شده که سبب تضعیف ساختار شده بودند، طوری در کنار یکدیگر قرار گرفتند که موجب تقویت شبکه و افزایش قدرت نگه‌داری آب شدند. علاوه بر این، ممکن است اتصال مولکول‌های کوچک به یکدیگر سبب کاهش تحرک و حلالیت آن‌ها شده باشد. به این معنی که در دومین مرتبه از ذوب و سانتریفوژ، مقدار کمتری از این مولکول‌ها به همراه آب خارج شده و درنتیجه وزن از دست رفته یا همان سینرسیس کاهش یافته است.

نمونه‌های هوا-۱ دقیقه و هوا-۲۰ دقیقه، تفاوت معنی‌داری با نمونه شاهد نداشتند. افزایش سینرسیس در نمونه هوا-۲۰ دقیقه،

احتمالاً به دلیل دپلیمریزاسیون شدید و قوام پایین این نمونه و تشکیل یک سیستم ژلی ضعیف بعد از فریز شدن است که موجب کاهش قدرت نگه‌داری آب در آن‌ها می‌گردد (Matsuguma *et al*., 2009; Pal *et al*., 2016). بنابراین، کاهش پایداری این نمونه در برابر انجماد–ذوب (در دوره اول) را نمی‌توان دلیلی بر افزایش رتروگراداسیون دانست. چراکه درجات مناسبی از اکسیداسیون و دپلیمریزاسیون، سبب تجزیه آمیلوز و الحاق گروه‌های آبدوست کربوکسیل می‌شود که کاهش رتروگراداسیون و افزایش پایداری در برابر انجماد–ذوب را به دنبال دارد (Liu *et al*., 2014). کاهش سینرسیس در نشاسته سورگوم استیله‌شده و نشاسته ذرت اکسیدشده به ترتیب توسط سینگ و همکاران (Singh *et al*., 2012) و لیو و همکاران (Liu *et al*., 2014) گزارش شده است.

در میان نمونه‌های تیمارشده با پلاسمای آرگون، پایداری در برابر انجماد–ذوب برای نمونه تیمارشده به مدت یک دقیقه، کمتر از نمونه شاهد بود. احتمالاً به دلیل اتصال عرضی و درشت شدن مولکول‌ها، تمایل آن‌ها به پیوستن به یکدیگر طی فاز ذوب بیشتر شده و درنتیجه سینرسیس بیشتری رخ داد. ژائو و همکاران (Zhao *et al*., 2015) و هزاریکا و سیت (Hazarika and Sit, 2016)، افزایش سینرسیس را در نشاسته‌های دارای اتصال عرضی گزارش کردند. نمونه تیمارشده با آرگون به مدت ۱۰ دقیقه نیز پایداری کمتری نسبت به نمونه شاهد داشت (به جز دوره اول). با افزایش زمان تیمار به ۲۰ دقیقه، پایداری نشاسته در دوره‌های ۲، ۳ و ۴ انجماد–ذوب با نمونه شاهد برابری می‌کرد و نسبت به نمونه‌های آرگون–۱ دقیقه و آرگون–۱۰ دقیقه بیشتر بود. همانطور که در آزمون‌های قبلی مطرح شد احتمالاً با افزایش زمان به ۲۰ دقیقه، بر مقدار واکنش‌های اکسیداسیون و دپلیمریزاسیون افزوده شد و به همین دلیل، پایداری در برابر انجماد–ذوب در نمونه آرگون–۲۰ دقیقه در مقایسه با سایر نمونه‌های تیمارشده با آرگون افزایش یافت (به استثنای دوره اول).

جدول ٤– تأثیر پلاسمای هوا و آرگون بر پایداری نشاسته سورگوم به دوره‌های متوالی انجماد–ذوب

Table 4- Effect of air and argon plasma on the freeze-thaw stability of sorghum starch

نمونه (Sample)	Freeze-thaw stability(%) پایداری در برابر انجماد–ذوب (% سینرسیس)			
	cycle1	cycle2	cycle3	cycle4
شاهد (Control)	45.04 ±1.57 [cB]	56.57 ± 2.65 [bA]	57.83 ± 1.70 [bA]	56.85 ± 1.09 [cA]
هوا–۱ دقیقه (Air-1 min)	42.12 ± 1.90 [cB]	55.07 ± 1.78 [bA]	56.04 ± 1.40 [bA]	56.66 ± 1.63 [cA]
هوا–۱۰ دقیقه (Air-10 min)	44.71 ± 2.11 [cB]	56.75 ± 1.86 [bA]	55.70 ± 1.12 [bA]	55.73 ± 1.87 [cA]
هوا–۲۰ دقیقه (Air-20 min)	62.94 ± 2.27 [aA]	54.18± 1.73 [bB]	48.38 ± 1.83 [cC]	49.06 ± 0.97 [dC]
آرگون–۱ دقیقه (Argon-1 min)	54.72 ± 1.06 [bC]	62.82 ± 1.04 [aB]	69.09 ± 1.01 [aA]	70.21 ± 0.90 [bA]
آرگون–۱۰ دقیقه (Argon- 10 min)	46.26 ± 1.16 [cC]	57.91 ± 1.04 [abB]	73.25 ± 1.16 [aA]	74.34 ± 1.25 [aA]
آرگون–۲۰ دقیقه (Argon-20 min)	53.37 ± 1.42 [bC]	54.72 ± 1.79 [bBC]	59.55 ± 1.40 [bA]	58.30 ± 1.19 [cAB]

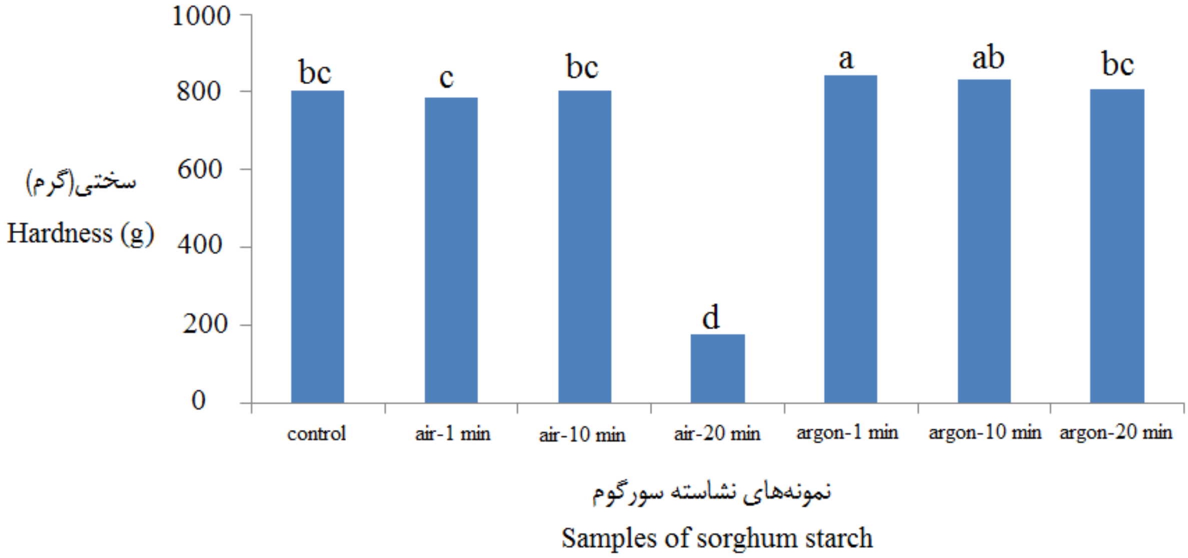
اعداد با حرف کوچک مشترک در یک ستون و اعداد با حرف بزرگ مشترک در یک ردیف، تفاوت معنی‌داری در سطح اطمینان ۹۵ درصد ندارند.

Numbers with the same small letters in a column and with the same capital letters in a row are not significantly different ($p < 0.05$).

سختی ژل

تشکیل ژل نشاسته پس از سرد شدن خمیر داغ، در اثر کریستالیزاسیون مجدد آمیلوز و تشکیل شبکه رخ می‌دهد. سختی ژل، حداکثر نیروی لازم جهت فشردن ژل تا ارتفاع مورد نظر است (Ehtiati, 2018). بر اساس شکل ۲، سختی ژل نمونه هوا–۲۰ دقیقه، کمتر از سایر نمونه‌ها بود که احتمالاً به دلیل دپلیمریزاسیون شدید و کاهش وزن مولکول‌های نشاسته و درنتیجه تضعیف ساختار درونی گرانول‌هاست (Biduski *et al*., 2017). نتایج مشابهی مبنی بر کاهش سختی ژل نشاسته سورگوم به دلیل تضعیف ساختار گرانول‌ها به دنبال تیمارهای اکسیداسیون و هیدرولیز اسیدی گزارش شده است (Biduski *et al*., 2017; Ali and Hasnain, 2014). نتایج سختی بافت تاییدی است بر این احتمال که افزایش سینرسیس در نمونه هوا–۲۰ دقیقه (در دوره اول انجماد–ذوب) به دلیل رتروگراداسیون نبوده بلکه مرتبط با تخریب ساختار گرانول بوده است.

بیشترین مقدار سختی مربوط به نمونه آرگون–۱ دقیقه بود. احتمالاً اتصالات عرضی سبب تقویت ساختار گرانول‌های نشاسته و مانع از شکستن آن‌ها شدند. همچنین ممکن است در اثر تورم بالای این نمونه (جدول ۲)، آمیلوز بیشتری نشت کرده باشد که سبب افزایش رتروگراداسیون و سفتی بافت می‌شود (Hazarika and Sit, 2016). با افزایش زمان تیمار پلاسمای آرگون، به تدریج از مقدار سختی ژل کاسته شد. همانطور که در آزمون‌های قبل نیز بیان شد، با افزایش زمان، احتمالاً واکنش‌های دپلیمریزاسیون و اکسیداسیون شدت گرفته که موجب کاهش رتروگراداسیون و سختی بافت در مقایسه با نمونه آرگون–۱ دقیقه شده است.



شکل ۲- تأثیر پلاسمای هوا و آرگون بر سختی ژل نشاسته سورگوم

Fig. 2- Effect of air and argon plasma on hardness of sorghum starch gel

نتیجه‌گیری

بر اساس پژوهش انجام‌گرفته، پلاسمای غیرحرارتی روش موفقی برای بهبود ویژگی‌های عملکردی نشاسته سورگوم بود که در این زمینه توانایی پلاسمای هوا بیشتر از پلاسمای آرگون بود. بیشترین مقادیر شفافیت، حلالیت و پایداری در برابر انجماد-ذوب در نمونه تیمارشده با هوا به مدت ۲۰ دقیقه ثبت گردید که طبق بررسی منابع، قابل رقابت با نشاسته‌های اکسیدشده به روش شیمیایی بود. بنابراین شاید بتوان با استفاده از پلاسمای غیرحرارتی به عنوان یک روش فیزیکی، نشاسته سورگوم مشابه نشاسته اکسیدشده تولید کرد. همچنین به نظر می‌رسد که واکنش‌های رخ‌داده در این دو پلاسما با یکدیگر متفاوت بوده‌اند. احتمالاً واکنش اصلی در پلاسمای هوا، اکسیداسیون و دپلیمریزاسیون است که با افزایش زمان تیمار، این واکنش‌ها نیز شدت یافتند. اما در تیمار با پلاسمای آرگون، احتمالاً در زمان کم (۱ دقیقه) اتصال عرضی مولکول‌های نشاسته رخ داده که موجب کاهش شفافیت شد و سپس با افزایش زمان، اثر واکنش‌های اکسیداسیون و دپلیمریزاسیون غالب گردید.

منابع

1. AACC International. (2000). *Approved Methods of Analysis*, 10 Ed. Methods 44-15a, 46-13, 30-25.01 and 08-01. Paul, MN.
2. Adkins, G.K., & Greenwoo, C.T. (1996). The Isolation of Cereal Starches in the Laboratory. *Starch/Staerke*, *18*, 213-218. https://doi.org/10.1002/star.19660180703
3. Ali, T.M., & Hasnain, A. (2014). Morphological, Physicochemical, and Pasting Properties of Modified White Sorghum (*Sorghum bicolor*) Starch. *International Journal of Food Properties*, *17*, 523-535. https://doi.org/10.1080/10942912.2012.654558
4. Biduski, B., Silva, F.T.D., Silva, W.M.D., Halal, S.L.M.E., Pinto, V.Z., Dias, A.R.G., & Zavareze, E.D.R. (2017). Impact of acid and oxidative modifications, single or dual, of sorghum starch on biodegradable films. *Food Chemistry*, *214*, 53-60. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.07.039
5. Chaiwat, W., Wongsagonsup, R., Tangpanichyanon, N., Jariyaporn, T., Deeyai, P., Suphantharika, M., Fuongfuchat, A., Nisoa, M., & Dangtip, S. (2016). Argon plasma treatment of tapioca starch using a semi-continuous downer reactor. *Food and Bioprocess Technology*, 9, 1125–1134. https://doi.org/10.1007/s11947-016-1701-6
6. Charoenrein, S., Tatirat, O., & Muadklay, J. (2008). Use of centrifugation–filtration for determination of syneresis in freeze–thaw starch gels. *Carbohydrate Polymers*, *73*(1), 143-147. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2007.11.012
7. Chong, W.T., Uthumporn, U., Karim, A.A., & Cheng, L.H. (2013). The influence of ultrasound on the degree of oxidation of hypochlorite-oxidized corn starch. *LWT– Food Science and Technology*, *50*(2), 439-443. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.lwt.2012.08.024

8. Ehtiati, A. (2018). *Effect of hydrocolloids and salt on Pasting and rheological properties of sorghum starch*. Faculty of Agriculture, Ferdowsi university of Mashhad, Mashhad.
9. Hazarika, B.J., & Sit, N. (2016). Effect of dual modification with hydroxypropylation and cross-linkingon physicochemical properties of taro starch. *Carbohydrate Polymers*, *140*, 269–278. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2015.12.055
10. Kaur, L., Singh, J., & Singh, N. (2006). Effect of cross-linking on some properties of potato starches. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, *86*, 1945–1954. https://doi.org/10.1002/jsfa.2568
11. Khorram, S., Zakerhamidi, M.S., & Karimzadeh, Z. (2015). Polarity functions' characterization and the mechanism of starch modification by DC glow discharge plasma. *Carbohydrate Polymers*, *127*, 72–78. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2015.03.056
12. Koo, S.H., Lee, K.Y., & Lee, H.G. (2010). Effect of cross-linking on the physicochemical and physiological properties of corn starch. *Food Hydrocolloids*, *24*, 619-625. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2010.02.009
13. Liu, J., Wang, B., Lin, L., Zhang, J., Liu, W., Xie, J., & Ding, Y. (2014). Functional, physicochemical properties and structure of cross-linked oxidized maize starch. *Food Hydrocolloids*, 36, 45-52. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2013.08.013
14. Matsuguma, L.S., Lacerda, L.G., Schnitzler, E., Filho, M.A.D.S.C., Franco, C.M.L., & Demiate, I.M. (2009). characterization of native and oxidized starches of two varieties of Peruvian carrot (*Arracacia xanthorrhiza*, B.) from two production areas of Paraná state, Brazil. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, *52*(3), 701-713. https://doi.org/10.1590/S1516-89132009000300022
15. McGrance, S.J., Cornell, H.J., & Rix, C.J. (1998). A simple and rapid colorimetric method for the determination of amylose in starch products. *Starch/Staerke*, *50*(4), 158-163. https://doi.org/https://doi.org/10.1002/(SICI)1521-379X(199804)50:4<158::AID-STAR158>3.0.CO;2-7
16. Mohammadamini, A. (2015). *Morphological, physico-chemical, and functional properties of starch nanocrystals*. Faculty of Agriculture, Ferdowsi university of Mashhad, Mashhad.
17. Olayinka, O.O., Adebowale, K.O., & Olu-Owolabi, I.B. (2013). Physicochemical properties, morphological and X-ray pattern of chemically modified white sorghum starch. (Bicolor Moench). *Journal of Food Science and Technology*, *50*(1), 70-77. https://doi.org/10.1007/s13197-011-0233-3
18. Pal, P., Kaur, P., Singh, N., Kaur, A., Misra, N.N., Tiwari, B.K., Cullen, P.J., & Virdi, A.S. (2016). Effect of nonthermal plasma on physico-chemical, amino acid composition, pasting and protein characteristics of short and long grain rice flour. *Food Research International*, *81*, 50-57. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.foodres.2015.12.019
19. Sarangapani, C.R., Rohit, T., Devi, Y., Trimukhe, A., Deshmukh, R.R., & Annapure, U.S. (2016). Effect of low pressure plasma on physiochemical properties of parboiled rice. *LWT- Food Science and Technology*, *69*, 482-489. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.lwt.2016.02.003
20. Singh, H., Sodhi, N.S., & Singh, N. (2009). Structural and functional properties of acid thinned sorghum starches. *International Journal of Food Properties*, *12*, 713-725. https://doi.org/10.1080/10942910801995614
21. Singh, H., Sodhi, N. S., & Singh, N. (2012). Structure and functional properties of acetylated sorghum starch. *International Journal of Food Properties*, *15*, 312-325. https://doi.org/10.1080/10942912.2010.483633
22. Subramanian, V., Hoseney, R.C., & Bramel-Cox, P. (1994). Shear thinning properties of sorghum and corn starches. *Cereal Chemistry*, *71*(3), 272-275.
23. Sukhija, S., Singh, S., & Riar, C.S. (2017). Molecular characteristics of oxidized and crosslinked lotus (*Nelumbo nucifera*) rhizome starch. *International Journal of Food Properties*, 1065-1081. https://doi.org/10.1080/10942912.2017.1328437
24. Thirumdas, R., Kadam, D., & Annapure, U.S. (2017a). Cold plasma: an Alternative Technology for the Starch Modification. *Food Biophysics*, *12*, 129-139. 10.1007/s11483-017-9468-5
25. Thirumdas, R., Trimukhe, A., Deshmukh, R.R., & Annapure, U.S. (2017b). Functional and rheological properties of cold plasma treated rice starch. *Carbohydrate Polymers*, *157*, 1723–1731. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2016.11.050
26. Vernon-Carter, E.J., Bello-Pérez, L.A., Lobato-Calleros, C., Hernández-Jaimes, C., Meraz, M., & Alvarez-Ramirez, J. (2015). Morphological, rheological and in vitro digestibility characteristics of gelatinized starch dispersion under repeated freeze-thaw cycles. *Starch/Stärke*, *68*, 84-91. https://doi.org/10.1002/star.201500178
27. Wang, Y.J., & Wang, L. (2003). Physicochemical properties of common and waxy corn starches oxidized by different levels of sodium hypochlorite. *Carbohydrate Polymers*, *52*, 207–217. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0144-8617(02)003041
28. Waterschoot, J., Gomand, S.V., Fierens, E., & Delcour, J.A. (2015). Production, structure, physicochemical and functional properties of maize, cassava, wheat, potato and rice starches. *Starch/Staerke*, *67*, 14-29. https://doi.org/10.1002/star.201300238

29. Wongsagonsup, R., Deeyai, P., Chaiwat, W., Horrungsiwat, S., Leejariensuk, K., Suphantharika, M., & Dangtip, S. (2014 a). Modification of tapioca starch by nonchemical route using jet atmospheric argon plasma. *Carbohydrate Polymers*, *102*, 790–798. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2013.10.089
30. Wongsagonsup, R., Pujchakarn, N., Jitrakbumrung, S., Chaiwat, W., Fuongfuchat, A., Varavinit, S., Dangtip, S., & Suphantharika, M. (2014 b). Effect of cross-linking on physicochemical properties of tapioca starch and its application in soup product. *Carbohydrate Polymers*, *101*, 656-665. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2013.09.100
31. Wu, T.Y., Chang, C.R., Chang, T.J., Chang, Y.J., Liew, Y., & Chau, C.F. (2019). Changes in physicochemical properties of corn starch upon modifications by atmospheric pressure plasma jet. *Food Chemistry*, 283, 46-51. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.01.043.
32. Zou, J.J., Liu, C.J., & Eliasson, B. (2004). Modification of starch by glow discharge plasma. *Carbohydrate Polymers*, 55(1), 23–26. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2003.06.001
33. Zhao, J., Chen, Z., Jin, Z., Buwalda, P., Gruppen, H., & Schols, H.A. (2015). Effects of granule size of cross-linked and hydroxypropylated sweet potato starches on their physicochemical properties. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 63, 4646-4654. https://doi.org/10.1021/jf506349w